

学校编码: 10384
学号: 19920061151863

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

廈門大學

硕 士 学 位 论 文

MEMS 器件的可靠性研究与测试系统的开发

**Reliability Investigation and Testing System
Development of MEMS Devices**

詹林献

指导教师姓名: 陈旭远教授 董涛副教授

专 业 名 称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2009 年 月

论文答辩时间: 2009 年 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2009 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

目前 MEMS 器件已经在很多领域都有广泛的应用, 与其他产业相比, 其产量却十分有限, 而造成这种商业化瓶颈的主要原因是技术供应商在 MEMS 器件的可制造性、可测试性、可靠性等方面的解决方案能力不足。鉴于 MEMS 器件的门类、品种繁多、所用的敏感材料各异以及 MEMS 制造技术的多样性和复杂性, 本论文则主要针对两种典型的 MEMS 器件(RF MEMS 开关与电容式 MEMS 压力传感器)进行相关的研究, 为 MEMS 器件更进一步的发展提供技术的积累。

电容式 RF MEMS 开关的商业化一直受阻于可靠性问题: 开关电介质的充电效应引起开关致动部件的粘连现象。本文中, 为了研究开关电介质的充放电机理, 我们建立一个新的基于金属-绝缘体-半导体 (MIS) 结构的理论模型。在不影响开关性能的前提下, 主要从以下这两方面来研究减少开关电介质的电荷积累: (1)减少电荷的注入; (2)提高电荷在电介质中的复合速度。实验中, 采用三个实验方案来减少电介质中的电荷积累: ①设计电压致动波形以中和注入电介质中的正负电荷; ②通过对电介质层掺杂创造电荷复合中心, 加速注入电荷的弛豫过程; ③制备复合介质薄膜, 创造界面电荷复合机制, 加速注入电荷的消逝。期望该研究工作能为提高电容式 RF MEMS 开关的可靠性提供理论支撑和技术积累。

同样的, MEMS 器件的研究进展也离不开其工程测试技术的提高。近年来, 随着 MEMS 技术的迅速发展, 从客观上要求测试仪器向自动化、智能化方向发展。本论文提出一套基于虚拟仪器、数据采集卡和图形化编程语言 LabVIEW 的 MEMS 压力传感器测试系统的构建方案。其工作原理为: 以计算机为控制中心, 通过设定恒温的测试环境, 采用数据采集卡对信号进行动态采集, 最后利用 LabVIEW 工具包数据处理模块进行数据的处理、显示以及报表打印, 从而达到自动测量传感器的目的。该系统可实现信号的采集、处理和发送, 解决了复杂的现场连线, 并且具有成本低、实用性强、移植性好等优点。

本文对这两种典型的 MEMS 器件进行相关的研究, 并且取得了一定的进展, 然而挑战依然存在, MEMS 的发展需要人们更多的科学研究和技术积累。

关键词: MEMS 器件, RF MEMS 开关, MEMS 压力传感器

厦门大学博硕士论文摘要库

ABSTRACT

At present, MEMS devices have a huge potential to be widely used in many fields. Compared with other industries, its production is very limited. The bottleneck for mass production and application of MEMS devices is manufacturability, testability and reliability.

For the diversity of MEMS devices and related material, and the complexity of manufacturing technology, it is impossible to characterize the properties of all MEMS devices in a dissertation. In this paper, two typical MEMS devices i.e. RF MEMS capacitive switch and capacitive MEMS pressure sensor were used for developing the techniques for investigation of reliability and testability of MEMS devices.

Radio frequency (RF) microelectromechanical system (MEMS) capacitive switches has a promising prospect on applications for military and commercial telecommunication systems. However, despite these highly attractive advantages, there are still some unsolved problems, which currently prevent MEMS switches from successful integration into practical RF systems and commercial products. The main problem is dielectric charging effect, which will cause irreversible stiction of the switch movable part. In this project, a new theoretical model based on metal-insulator-semiconductor (MIS) structures was established for stiction modeling to investigate the charging and discharging mechanism within the dielectric of MEMS capacitive switches. Two technical schemes for reducing charge accumulation without changing the basic principle of the switch were proposed: (1) reducing charge injection and (2) increasing the speed of charge combination within the dielectrics. In experiments, three methods were conducted to reduce charge accumulation: ① Designing the multi-magnitude wave for actuation voltage for injecting both negative and positive polarity charges to neutralize the injected charge; ② Doping dielectric layer with donor or acceptor type impurity for creating recombination centers to speed up relaxation process of injected charge; ③ Depositing multi-layer dielectric layer for

creating interface recombination mechanism to assist the vanishing process of the injected charge. The research work can provide theoretical background and practical techniques to improve the reliability of MEMS capacitive switches.

As second part of this thesis, we presents a construction project which based on virtual instrumentation, data acquisition card and LabVIEW graphical programming language for the MEMS pressure sensor test system. Using computer as the control center, the test environment parameters, such as temperature, can be settled. Dynamic signal is obtained by the data acquisition card, handled by the data-processing module of LabVIEW toolkit, displayed and printed automatically. The system can realize multiple functions, such as signal acquisition, processing and presentation, and can be used as in house test tool.

This paper mainly includes two kinds of typical MEMS devices and has made some progress. However challenges still hinder the development of MEMS, which requires continuous scientific research and technological exploration in future.

Keywords: MEMS device, RF MEMS switch, MEMS pressure sensor

目录

第一章 绪论	1
1.1 MEMS 的概况	1
1.1.1 MEMS 的基本概念	1
1.1.2 MEMS 的基本特点	2
1.1.3 MEMS 技术分类及应用	3
1.2 研究背景和意义	6
1.3 本论文主要研究内容和创新	6
1.3.1 MEMS 器件（射频开关）的可靠性研究	6
1.3.2 MEMS 器件（压力传感器）的测试系统开发	7
1.3.3 本论文的创新	7
参考文献	7
第二章 MEMS 技术在射频和传感领域的应用	9
2.1 引言	9
2.2 RF MEMS 开关的概述	9
2.2.1 RF MEMS 器件的简介	9
2.2.2 RF MEMS 开关的分类	10
2.2.3 国内外研究现状与分析	12
2.3 MEMS 压力传感器的概述	13
2.3.1 MEMS 压力传感器及其发展	13
2.3.2 电容式 MEMS 压力传感器	13
2.3.3 电容式传感器的检测电路	15
2.4 本章小结	19
参考文献	19
第三章 MEMS 器件（射频开关）的可靠性研究	21
3.1 引言	21
3.2 电容式 RF MEMS 开关可靠性分析模型的建立	21

3.3 氮化硅薄膜充/放电机制的研究	25
3.3.1 硅晶片的清洗	26
3.3.2 氮化硅薄膜的制备	26
3.3.3 氮化硅薄膜介质 MIS 器件的制备	27
3.3.4 MIS 器件的电容-电压 (C-V) 测量装置	28
3.3.5 直流电压对 MIS 器件充放电特性和电荷迟豫的影响	28
3.3.6 MIS 器件的放电特性	31
3.3.7 致动电压波形对充电电荷控制的研究	32
3.4 离子注入对电介质材料电荷积累的影响	34
3.4.1 氮化硅薄膜的离子注入掺杂	34
3.4.2 介质薄膜样品的 C-V 特性曲线	34
3.4.3 对 LPCVD 样品进行加压后的测试结果分析	36
3.4.4 对 PECVD 样品进行加压后的测试结果分析	37
3.4.5 实验结果讨论	38
3.5 复合介质膜的充放电特性研究	39
3.5.1 复合介质膜的制备	39
3.5.2 复合介质膜的 C-V 特性曲线	40
3.5.3 恒压下的充放电特性的研究	41
3.5.4 实验结果讨论	42
3.6 本章小结	42
参考文献	42
第四章 MEMS 器件(压力传感器)测试系统的开发	45
4.1 引言	45
4.2 MEMS 压力传感器的制作工艺及测试方法的研究	45
4.2.1 MEMS 电容式压力传感器的结构和工作原理	45
4.2.2 接触式电容压力传感器的基本原理和结构	46
4.2.3 接触式电容压力传感器的 ANSYS 仿真	47
4.2.4 传感器的制作工艺的研究	50
4.3 MEMS 压力传感器的标定	52

4.3.1 标定的定义.....	52
4.3.2 传感器的静态标定.....	52
4.3.3 传感器的动态标定.....	53
4.3.4 最小二乘法线性拟合原理.....	54
4.4 测试系统的硬件平台设计	55
4.4.1 测试系统的方案选择及原理框架.....	55
4.4.2 测试系统的硬件设计.....	57
4.4.3 数据采集卡及其他硬件.....	58
4.5 测试系统的电路设计	60
4.5.1 电容-电压转换电路的设计	60
4.5.2 CAV424 芯片.....	60
4.5.3 电路板制版流程.....	65
4.6 测试系统的软件设计	68
4.6.1 图形化编程语言—LabVIEW 简介	68
4.6.2 测试系统的软件设计框图.....	69
4.6.3 虚拟测试系统前面板的设计.....	70
4.6.4 软件的模块化设计.....	71
4.6.5 软件的封装.....	77
4.7 本章小结	79
参考文献	80
第五章 总结	81
致谢	83
攻读硕士阶段发表的论文	85

CONTENTS

CHAPTER 1 INTRODUCTION	1
1.1 OVERVIEW OF MEMS TECHNOLOGY	1
1.1.1 The basic concept of MEMS	1
1.1.2 The basic characteristics of MEMS	2
1.1.3 Classification and application of MEMS technology	3
1.2 THE BACKGROUND AND SIGNIFICANCE OF THE THESIS PROJECT	6
1.3 THE MAIN CONTENT AND INNOVATION OF THE THESIS	6
1.3.1 Reliability study of MEMS device (RF Switch)	6
1.3.2 Development of Test System for MEMS pressure sensor	7
1.3.3 The innovation of this paper	7
REFERENCES	8
CHAPTER 2 THE MEMS IN THE AREAS OF SENSING AND RF APPLICATIONS	9
2.1 INTRODUCTION	9
2.2 RF MEMS SWITCH	9
2.2.1 Brief introduction of RF MEMS device	9
2.2.2 The classification of RF MEMS switch	10
2.2.3 Reaserch overview	12
2.3 MEMS PRESSURE SENSOR	13
2.3.1 Overview of MEMS pressure sensors	13
2.3.2 Capacitive MEMS pressure sensor	13
2.3.3 Capacitance test circuit	15
2.4 CONCLUSION	19
REFERENCES	19
CHAPTER 3 RELIABILITY STUDY OF RF MEMS SWITCH	21

3.1 INTRODUCTION	21
3.2 RELIABILITY ANALYSIS	21
3.3 CHARGING MECHANISM IN SILICON NITRIDE FILM	26
3.3.1 Silicon wafer cleaning	26
3.3.2 Preparation of silicon nitride thin films	26
3.3.3 Preparation of MIS devices	28
3.3.4 The C-V measurements	28
3.3.5 The C-V characteristic curve under constant voltage stress	29
3.3.6 The charging behavior of MIS devices	31
3.3.7 The kinetics of dielectric charging	33
3.4 THE EFFECT OF ION IMPLANTATION IN DIELECTRIC LAYER	35
3.4.1 Ion implantation in silicon nitride thin films	35
3.4.2 The C-V characteristic curve of dielectric	35
3.4.3 Results and analysis for SiN _x deposited by LPCVD	37
3.4.4 Results and analysis for SiN _x deposited by PECVD	38
3.4.5 Experimental results and discussions	39
3.5 CHARGING CHARACTERISTICS IN COMPOSITE DIELECTRIC FILMS	40
3.5.1 Preparation of composite dielectric films	40
3.5.2 The C-V characteristic curve of composite dielectric films	41
3.5.3 Constant voltage stress experiments	42
3.5.4 Experimental results and discussions	43
3.6 CONCLUSION	43
REFERENCES	44

CHAPTER 4 DEVELOPMENT OF TEST SYSTEM FOR CAPACITIVE MEMS

PRESSURE SENSOR	45
4.1 INTRODUCTION	45
4.2 FABRICATION AND TEST OF MEMS PRESSURE SENSOR	45
4.2.1 Structure and working principle of MEMS pressure sensor	45

4. 2. 2 Touch mode capacitive pressure sensor (TMCPS).....	46
4. 2. 3 Finite element analysis of TMCPS	48
4. 2. 4 Process design	50
4.3 CALIBRATION OF MEMS PRESSURE SENSOR	52
4. 3. 1 Introduction for calibration process	52
4. 3. 2 The Static calibration of sensor.....	53
4. 3. 3 The dynamic calibration of sensor	52
4. 3. 4 Least squares linear fitting	54
4.4 THE DESIGN OF HARDWARE PLATFORM	55
4. 4. 1 Design principle.....	55
4. 4. 2 Hardware design.....	57
4. 4. 3 Data acquisition card and other hardware	59
4.5 CIRCUIT FOR TEST SYSTEM	60
4. 5. 1 The design of C-V converter circuit.....	60
4. 5. 2 CAV424 chip	60
4. 5. 3 Fabrication and test of the circuit.....	65
4.6 SOFTWARE DEVELOPMENT FOR TEST SYSTEM.....	68
4. 6. 1 Brief introduce of LabVIEW	68
4. 6. 2 The block diagram of software	69
4. 6. 3 The design of front panel	70
4. 6. 4 The modular design of software.....	71
4. 6. 5 Software package.....	77
4.7 CONCLUSION	79
REFERENCES.....	79
 CHAPTER 5 CONCLUSIONS	 81
 ACKNOWLEDGEMENT	 83
 PUBLICATIONS.....	 83

第一章 绪论

1.1 MEMS 的概念

1.1.1 MEMS 的基本概念

1959 年,诺贝尔物理奖获得者理查德·费曼发表文章《There is plenty of room at the bottom》,他指出“在微尺度上操控物体的研究还是一片空白”,而这个领域“可能会展现出很多在复杂情形下出现的有趣而奇怪的现象”。他预言该领域“将会有大量的工程应用”^[1]。费曼的远见卓识一直激励着许多科学家向微小世界挺进,此后,产生了 MEMS 技术。

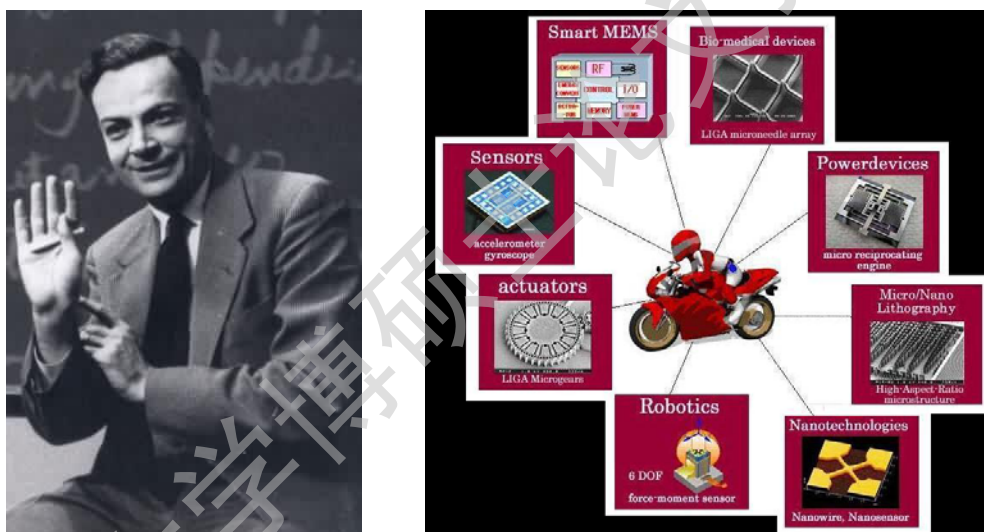


图 1.1 美国理论物理学家理查德·费曼与现代 MEMS 技术的应用

MEMS(Micro Electro Mechanical System)即微电子机械系统,它是几何尺寸或操作尺寸仅在毫米、微米、甚至纳米范围内的机电装置,(如微机构、微驱动器、微传感器、微处理器),与前置电路、控制电路高度集成于一个非常小的空间里,组成一个机电一体化的器件或系统^[2]。

1989 年后 MEMS 一词就渐渐成为一个世界性的学术用语, MEMS 技术的研究与开发也日益成为国际研究的热点。MEMS 将电子系统和外部世界有机联系起来,它不仅可以感受运动、光、声、热、磁等自然界信号,将这些信号转换成电子系统可以识别的电信号,而且还可以通过电子系统控制这些信号。MEMS

的研究内容不仅包括机械科学、微电子学，还涉及现代光学、气动力学、流体力学、热力学、声学、磁学、自动控制、仿生学、材料科学及表面物理与化学等领域，它是一门多学科的综合科学^[3]。

1.1.2 MEMS 的基本特点

MEMS 不仅仅是传统机械在尺度上的微型化，它已远远超出了传统机械的概念和范畴，而是基于现代科学技术，并作为整个纳米科学技术的重要组成部分，用一种崭新的思维方法指导下的产物。同传统机械相比在材料、机构设计、摩擦特性、加工方法、测试与定位、驱动方式等方面都有很大的不同，产生很多由于结构微型化而导致的特殊问题。如图 1.2 所示，MEMS 是集微型传感器、执行器以及信号处理和控制电路、接口电路、通信和电源于一体的微型机电系统。概括起来，MEMS 具有以下几个基本特点，微型化、智能化、多功能、高集成度和适于大批量生产。



图 1.2 MEMS 的组成

MEMS 技术的目标是把信息的获取、处理和执行集成在一起，组成具有多功能复合的微型智能系统。它们不仅可以降低机电系统的成本，而且还可以完成大尺寸机电系统所不能完成的任务；也可以嵌入大尺寸系统中，从而大幅度地提高系统的自动化、智能化和可靠性水平。MEMS 技术开辟了一个全新的领域和

产业。MEMS 的研究目标就是通过系统的微型化、集成化来探索具有新原理、新功能的元件和系统并使之实用化、产业化。MEMS 系统在工业、信息通信、国防、航空航天、航海、医疗、生物工程、农业、环境和家庭服务等领域有着潜在的巨大应用前景，它将成为本世纪重要的科技领域和主要的支柱技术之一，MEMS 的发展具有很大的市场潜力，将对社会和经济产生重大影响。

1.1.3 MEMS 技术分类及应用

目前对MEMS 的需求产业主要来自于汽车工业、通信网络信息业、军事装备应用、生物医学工程；而按专业MEMS分四大类：生物MEMS技术、光学MEMS技术、射频MEMS技术、传感MEMS技术^[4]。

1. 生物MEMS技术

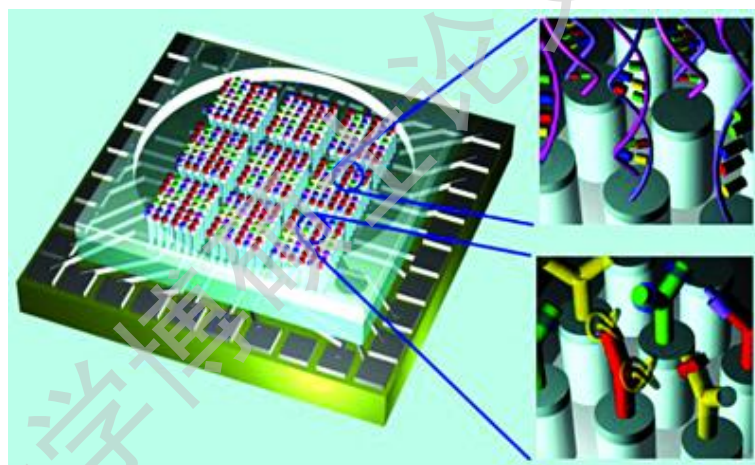


图1.3 基于MEMS技术加工的三维生物芯片^[4]

生物MEMS 技术是用MEMS技术制造的化学/生物微型分析和检测芯片或仪器,有一种在衬底上制造出的微型驱动泵、微控制阀、通道网络、样品处理器、混合池、计量、增扩器、反应器、分离器以及检测器等元器件并集成为多功能芯片,可以实现样品的进样、稀释、加试剂、混合、增扩、反应、分离、检测和后处理等分析全过程,它把传统的分析实验室功能微缩在一个芯片上。生物MEMS系统具有微型化、集成化、智能化、成本低的特点。功能上有获取信息量大、分析效率高、系统与外部连接少,具有实时通信、连续检测的特点。国际上生物MEMS的研究已成为热点,在不久将为生物、化学分析系统带来一场重大的革新。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库